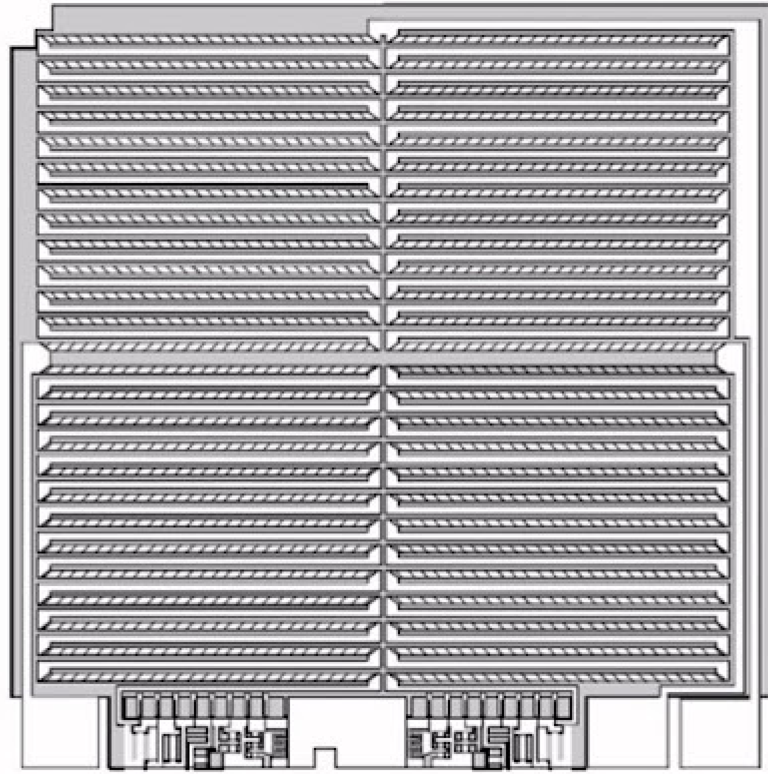
Magnetoresistieve sensoren

Behalve Hall-sensoren kunt u ook MR-sensoren toepassen voor het meten en registreren van magnetische velden. Deze sensoren werken echter volgens een totaal ander natuurkundig verschijnsel dan hun Hall-effect soortgenoten, namelijk het 'magnetoresistieve effect'.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 19-02-2021

Werking en principes van MR-sensoren

De principiële werking
Lord Kelvin ontdekte de '*magnetoresistentie'* in 1857 toen hij een zeer geringe verandering in de elektrische weerstand van een stuk ijzer opmerkte wanneer hij het in een magnetisch veld plaatste. Maar het duurde meer dan 100 jaar voordat een eerste concept van een '*magnetoresistieve*' (MR) sensor werd ontwikkeld door Hunt in 1971.
De in dit artikel besproken magnetisch gevoelige sensoren berusten qua werking op het principe van dit zogenoemde '*magnetoresistieve effect*'. Dit effect heeft veel gemeen met het '*Hall-effect*', maar is toch wezenlijk anders.
Onder invloed van magnetische velden wijzigen bepaalde ferromagnetische materialen hun elektrische weerstand. Hierbij is de weerstandsverandering zowel afhankelijk van de grootte van de veldsterkte als van de hoek tussen de stroomrichting door de sensor en het inwerkend magnetisch veld. Een voor dit effect geschikt materiaal is bijvoorbeeld permalloy ($Ni_{81}Fe_{19}$) dat door middel van dunne laag technologie, bijvoorbeeld foto-lithografie, op silicium chip's kan worden aangebracht.
De layout van een dergelijke magnetoresistieve chip ziet er streepvormig uit, zoals voorgesteld in de onderstaande figuur. De strepen worden tijdens het foto-lithografisch proces op de geoxideerde siliciumwafel opgedampt. Door middel van deze dunne film technologie kunnen effectieve en goedkope sensoren worden gefabriceerd.



De oppervlakte structuur van een magnetoresistieve sensor.
(© 2000 Philips Semiconductors)

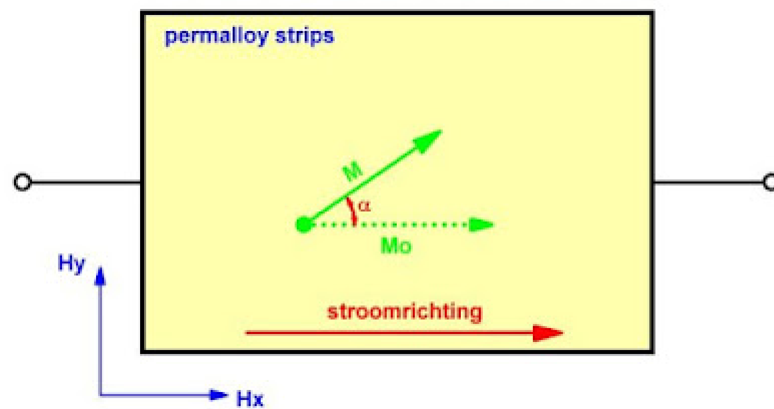
De fysische werking
De natuurkundige wetmatigheid waaraan dergelijke sensoren gehoorzamen is het feit dat de elektrische weerstand van het opgedampte materiaal afhankelijk is van de hoek tussen de magnetisatie en de richting van de stroom door de laag. Dit wordt ook wel het '*anisotrope magnetoresistieve effect*' genoemd, omdat in verschillende richtingen diverse fysische eigenschappen optreden.
De weerstandsvariatie kan worden uitgedrukt met de onderstaande formule:
$R = R_o + [\Delta R_o \cdot \cos^2 \alpha]$
In deze formule zijn:

- R: De weerstand van de magnetoresistieve strip.
- R_o: De specifieke weerstand in de voorkeursrichting.
- ΔR_o: De invloed als gevolg van het magnetoresistieve effect.
- α: De hoek tussen de stroom I door de strip en de magnetisatie M van de strip.

Hierdoor ontstaat een weerstandsverandering die evenredig is aan de magnetische flux.

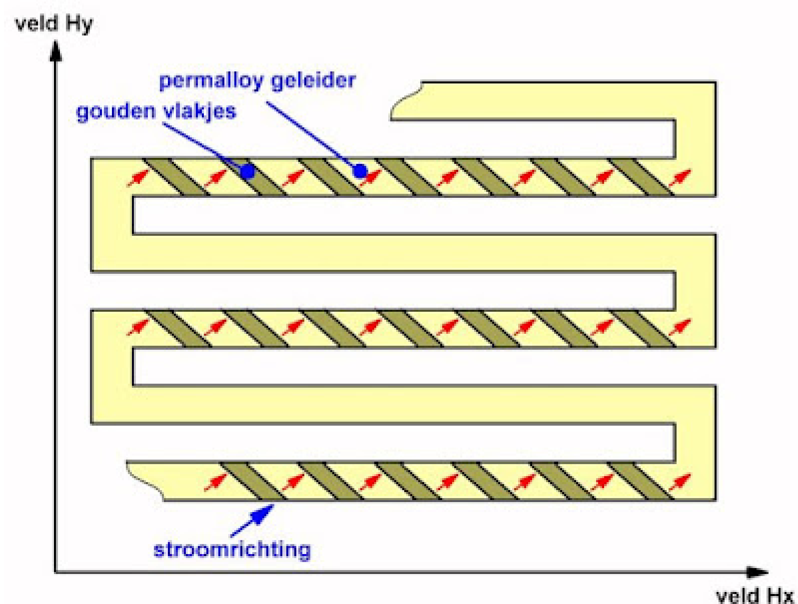
De primitieve Hunt-sensor
Deze sensor bestaat uit een aantal in serie geschakelde permalloy strips. Is het extern magnetisch veld geheel afwezig, dan is volgens de fysische wetmatigheden de richting van de magnetisatie in de afzonderlijke elementen van het ferromagnetische materiaal niet uniform. Door middel van een daartoe geëigende technologie (opdampen, sputteren) wordt bereikt dat de dunne magnetische strips een bepaalde voorkeursrichting qua magnetisatie verkrijgen. Zodoende verloopt zonder extern toegevoerd veld Hy de magnetisatie M_o langs de in de x-richting aangebrachte weerstand strippen.
Wordt er een extern magnetisch veld in de richting Hy aangelegd, dan vindt er een verdraaiing van de magnetisatie in de strippen plaats. De magnetisatie in de strips gaat dan onder een bepaalde hoek α verlopen, zie M in de onderstaande figuur. De maximale relatieve verandering van de weerstandsverhouding $\Delta R_o/R$ bedraagt bij benadering 2 % tot 3 % voor permalloy materiaal.
Het verband tussen een extern magnetisch veld Hy en de hoek α wordt bepaald door de geometrische afmetingen van de strip en de magnetische anisotropie van het toegepaste materiaal (permalloy). Het zal echter duidelijk zijn dat dit verband niet lineair is. Kijk maar naar

de reeds gegeven formule, waarin een cosinus-term terug te vinden is!



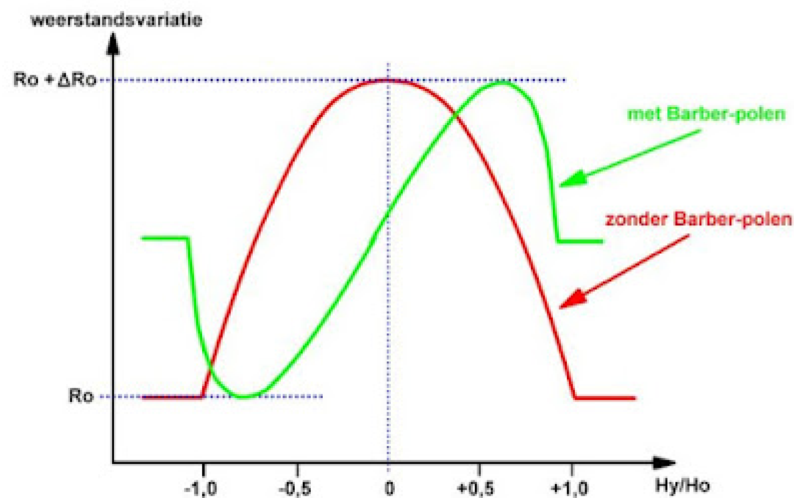
Verband tussen stroomrichting en magnetisatie in een Hunt-sensor.
(© 2021 Jos Verstraten)

Introduceren van Barber-polen
Om magnetische velden meettechnisch gemakkelijk te verwerken, is een lineaire karakteristiek noodzakelijk. Deze wordt verkregen door de geometrie van de sensor met zogenoemde '*Barber-polen*' uit te voeren. De strippen worden bedekt met reepjes aluminium of goud die onder een hoek van 45° ten opzichte van de as van de strips worden geplaatst, zie de onderstaande figuur. Omdat de reepjes aluminium of goud in vergelijking met permalloy zeer laagohmig zijn, wordt binnen de afzonderlijke zones een verandering in de stroomrichting met 45° ten opzichte van de voorkeursrichting gerealiseerd.



Het aanbrengen van zogenoemde 'Barber-polen' voor het lineariseren van de werking.
(© 2021 Jos Verstraten)

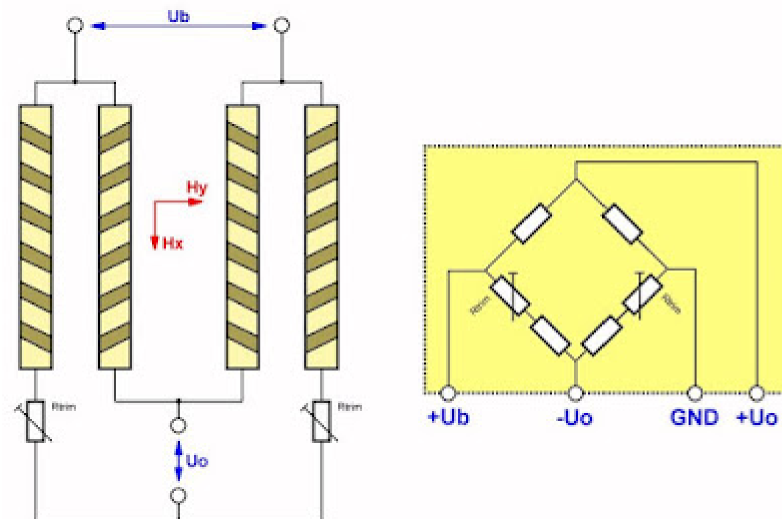
De invloed van deze Barber-polen wordt spectaculair toegelicht in de onderstaande figuur. Hierin wordt het verband tussen magnetisch veld en weerstandsvariatie weergegeven voor een sensor mét en zonder Barber-polen. Dank zij deze technologie kan men zeer gevoelige sensoren maken voor het meten van magnetische velden binnen het bereik van 100 nT tot 0,1 T en van DC tot 100 MHz.
Uit deze grafiek kunt u ook nog concluderen dat de sensoren gevoelig zijn voor magnetische velden in twee richtingen. De schaalindelingen zijn volledig hypothetisch en alleen ingetekend in de grafiek om de symmetrie van de werking weer te geven.



De karakteristieken van een magnetoresistieve sensor mét en zonder Barber-polen. (© 2021 Jos Verstraten)

De constructie van een magnetoresistieve sensor

De complete rangschikking van de strippen van een magnetoresistieve chip wordt meandervormig uitgevoerd. Nadien worden vier van dergelijke elementen samengevoegd tot een brug van Wheatstone, die vanuit een spanning U_b wordt gevoed, zie de onderstaande figuur. Dankzij de brugschakeling worden temperatuurinvloeden gecompenseerd. Uit het schema kunt u afleiden dat iedere halve brug bestaat uit twee magnetoresistieve weerstand elementen waarvan de Barber-polen verschillend zijn gericht. De brug wordt met behulp van een laser afgeregeld op de exacte nominale waarde. Rechts ziet u dezelfde constructie, maar nu hoe zij meestal wordt voorgesteld in elektronische schema's.



De praktische samenstelling van een MR-sensor. (© 2021 Jos Verstraten)

De schakeling van de brug

De spanning tussen de beide weerstanden van een halve brug verandert afhankelijk van de inwerking van een magnetisch veld. De ene weerstand neemt toe, terwijl de andere als gevolg van de geometrie afneemt. Wordt een tweede halve brug met tegengestelde rangschikking van de Barber-polen toegevoegd, dan ontstaat de complete brug van Wheatstone. Het spanningsverschil U_o tussen de beide halve bruggen vormt het uitgangssignaal van het sensorelement. Met een extra trimweerstand wordt elke halve brug op ½U_b ingesteld, zodat ingeval van een niet inwerkend magnetisch veld de uitgangsspanning zo dicht mogelijk bij 0 V ligt.

Introduceren van een hulpveld Hx

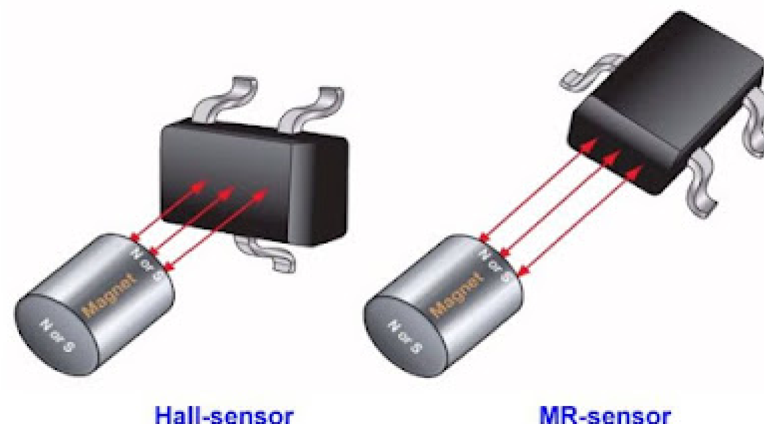
Alleen de vorm van de strip en de anisotropie van het materiaal permalloy zijn bepalend voor de werking bij een ontbrekend extern magnetisch veld Hy. Dit betekent dat in deze toestand

de strip zones met verschillende magnetisatie richtingen kan hebben. Onder deze condities werkt de sensor niet betrouwbaar. Een betrouwbare werking van de sensor wordt wél verkregen door het aanleggen van een magnetisch hulpveld Hx, waardoor er een vaste magnetisatie richting wordt gecreëerd.
Voor het opwekken van het hulpveld volstaat een kleine permanente magneet. Deze magneet kan bijvoorbeeld op de behuizing van de sensor worden gelijmd. Bij de typen ZMY20M en ZMZ20M van Zetex is een andere mogelijkheid toegepast. Bij deze sensoren is de magneet in de behuizing geïntegreerd waardoor in combinatie met de uitvoering als SMD-component een zeer compact sensorelement is gerealiseerd.

Reset-optie
Sommige MR-sensoren hebben een reset-optie ingebouwd, waarmee u de invloed van een sterk magnetisch veld op de interne magnetisatie kunt resetten. In de meeste gevallen bestaat deze optie uit een in de Hunt-sensor ingebouwde dunne film weerstand waardoor een zeer korte maar grote stroompuls wordt gestuurd. Het magnetisch veld dat deze stroom in de sensor introduceert reset de interne magnetisatie van de sensor.

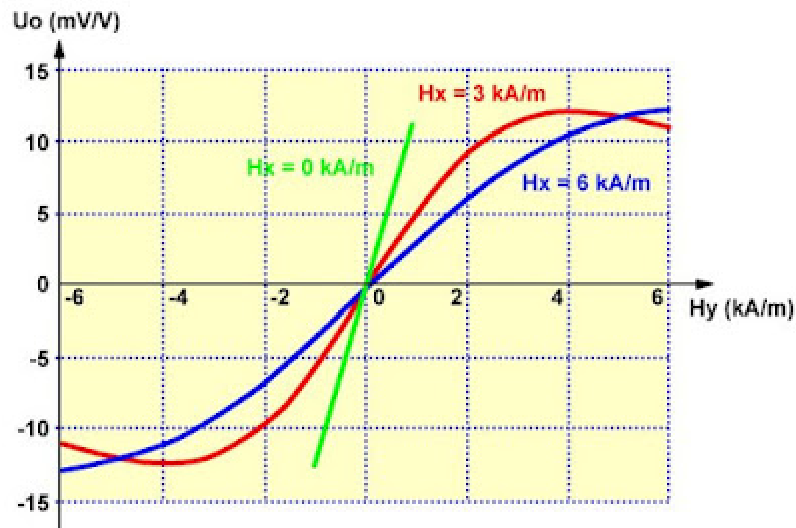
De eigenschappen van MR-sensoren

Het grote verschil met Hall-sensoren
Uit de onderstaande figuur wordt meteen duidelijk wat het grote verschil is tussen Hall- en MR-sensoren. Het betreft de invalshoek van het magnetisch veld dat u wilt meten. Bij Hall-sensoren valt dit veld loodrecht in op de sensor. Bij MR-sensoren moet u de sensor zó monteren dat het veld in de horizontale richting invalt op de sensor.



De invalshoek van het magnetisch veld bij Hall- en MR-sensoren. (© 2015 Honeywell)

De gevoeligheid
De gevoeligheid S (mV/V per kA/m) van de magnetoresistieve sensor is gedefinieerd als een toename van de uitgangsspanning als gevolg van het externe veld Hy in het bereik van -1 kA/m tot +1 kA/m. De karakteristieke waarde S is afhankelijk van de geometrie van de permalloy-meander en van het hulpveld Hx. De laatstgenoemde invloed wordt toegelicht aan de hand van de karakteristiek van de onderstaande figuur, waarbij Hx als parameter met waarden van 0 kA/m, 3 kA/m en 6 kA/m is opgevoerd. Opvallend is het zeer beperkte bruikbare werkgebied als het hulpveld gelijk aan nul is. Wél is de gevoeligheid van de sensor dan heel hoog: een kleine variatie van het Hy-veld heeft een grote variatie van de uitgangsspanning tot gevolg. Hieruit kunt u dus afleiden dat een grote gevoeligheid gepaard gaat met een beperkt Hy-werkgebied.
Noteer dat de gevoeligheid wordt uitgedrukt in mV/V. Dit betekent dat de uitgangsspanning ook afhankelijk is van de grootte van de voedingsspanning van de brug.



De gevoeligheid van een magnetoresistieve sensor.
(© 2021 Jos Verstraten)

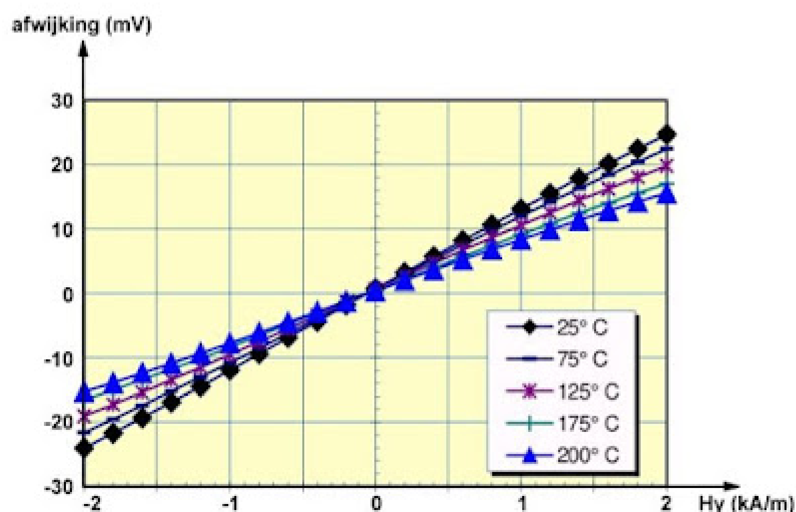
De offset

De brug van Wheatstone is in een toestand zonder extern veld afgeregeld. In dit geval ligt de uitgangsspanning U_o in de buurt van 0 V bij kamertemperatuur. De afwijking van de uitgangsspanning ten opzichte van het nulpunt wordt als offsetspanning aangeduid en als U_{off}/U_o in mV/V gespecificeerd. De offset wordt veroorzaakt door kleine geometrische toleranties van de componenten van de brugschakeling die het gevolg zijn van het foto-lithografische proces.

Het vereffenen van de offset van de brug wordt gerealiseerd met behulp van een laser (lasertrimming) waarbij de uitgangsspanning van elke halve brug op ½Ub wordt ingesteld.

De temperatuurscoëfficiënt

De brugweerstand R_{brug} van een magnetoresistieve sensor bezit een lineaire temperatuursafhankelijkheid. De bijbehorende temperatuurscoëfficiënt van de brug is positief, dat wil zeggen dat deze toeneemt bij een stijgende temperatuur, zie de onderstaande afbeelding. De temperatuurscoëfficiënt van de gevoeligheid daarentegen is negatief, omdat de invloed van het magnetoresistieve effect met het toenemen van de temperatuur geringer wordt. Voedt u met een constante stroom, dan wordt de temperatuursafhankelijkheid van de gevoeligheid ten gevolge van het lineaire verband tussen in- en uitgangsspanning kleiner. Een hogere brugweerstand ten gevolge van een temperatuurstijging leidt tot een hogere spanning over het sensorelement waardoor de verandering van de gevoeligheid voor een deel wordt gecompenseerd. Toch kan de brug van Wheatstone de invloed van de temperatuur niet geheel onderdrukken.



De invloed van de temperatuurscoëfficiënt op de uitgang van een MR-sensor. (© 2021 Jos Verstraten)

De hysteresis
De hysteresis van de uitgangsspanning beschrijft de nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid van de magnetoresistieve sensor. De magnetisatie van de permalloy strip is niet geheel homogeen. Er zijn bepaalde kleine plekjes van de meander, met name in de hoeken van de strippen, waarin de magnetisatie niet exact met het hulpveld overeenkomt. De hysteresis wordt in een opstelling gemeten, waarin men de Hy eerst van -3 kA/m tot +3 kA/m laat toenemen en nadien terug gaat tot 0 kA/m. Bij deze procedure wordt het hulpveld ingesteld op Hx = 3 kA/m. De hysteresis beschrijft in dat geval de verschuiving van de offsetspanning, die wordt veroorzaakt door deze hysteresis lus.

Het meetbereik
Het maximale bereik van de uitgangsspanning $\Delta U_o/U_b$ (mV/V) wordt als het verschil van de uitgangsspanning bij $\alpha = 0°$ en $\alpha = 90°$ gedefinieerd, waarbij α de hoek tussen stroom en magnetisatie van de magnetoresistieve strip voorstelt. Dit betekent dat deze grootheid staat voor de sterkte van het magnetoresistieve effect.

Toepassingen van MR-sensoren

Inleiding
Magnetoresistieve sensoren zijn ideale onderdelen voor:
- Het meten van stromen.
- Het meten van toerentallen.
- Het meten van kleine lineaire verplaatsingen.
- Het meten van hoekverdraaiingen.

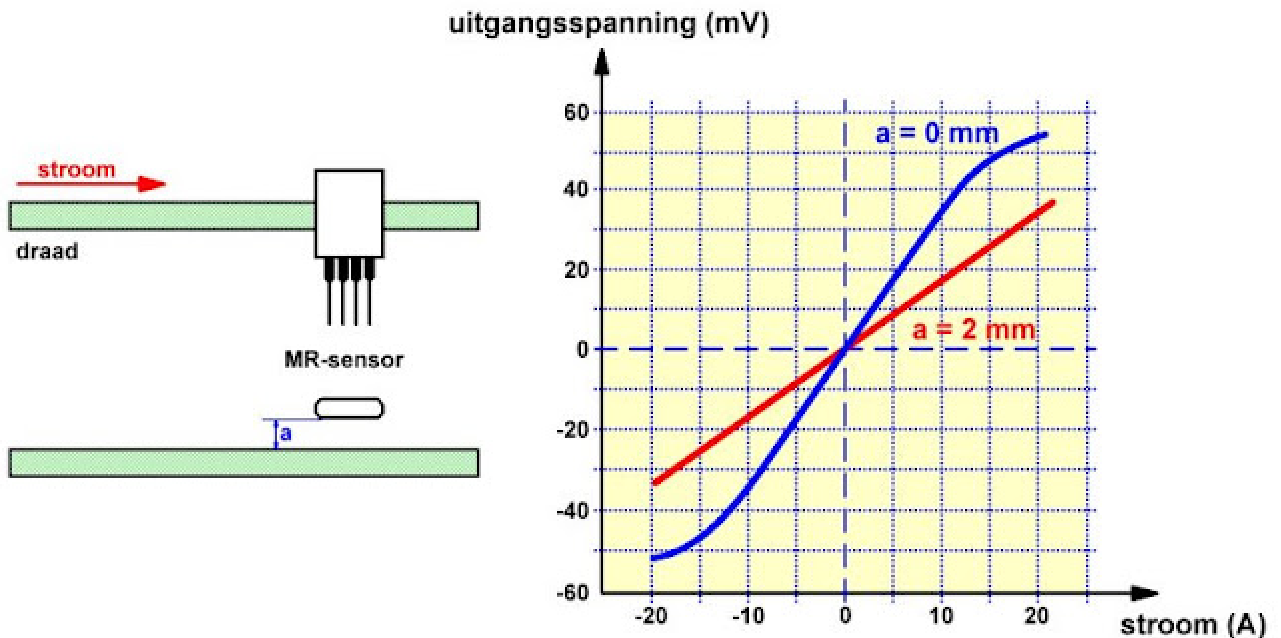
Het meten van stromen
Voor het meten van kleine tot gemiddelde stromen (gelijk- en wisselstroom) zijn drie gangbare oplossingen bekend:

- De traditionele methode van het opnemen van een stroom-shunt in de leiding waarin u de stroom wilt meten, waarna u de spanning over deze weerstand kunt meten.
- Het transformator principe, waarbij de te meten wisselstroom door een kleine primaire wikkeling van een stroomtrafo wordt gevoerd en u secundair een met de stroom recht evenredige spanning kunt meten.
- Meten met stroomtangen, die rond de stroomvoerende geleider worden geklemd.

Deze methoden hebben een of meerdere van de onderstaande nadelen:
- Het ontbreken van een galvanische scheiding.
- De noodzaak van een kalibratie procedure.
- Vermogensverliezen.
- Meetfouten en -onnauwkeurigheden.
- Invloed van harmonischen.
- Beperkte bandbreedte.

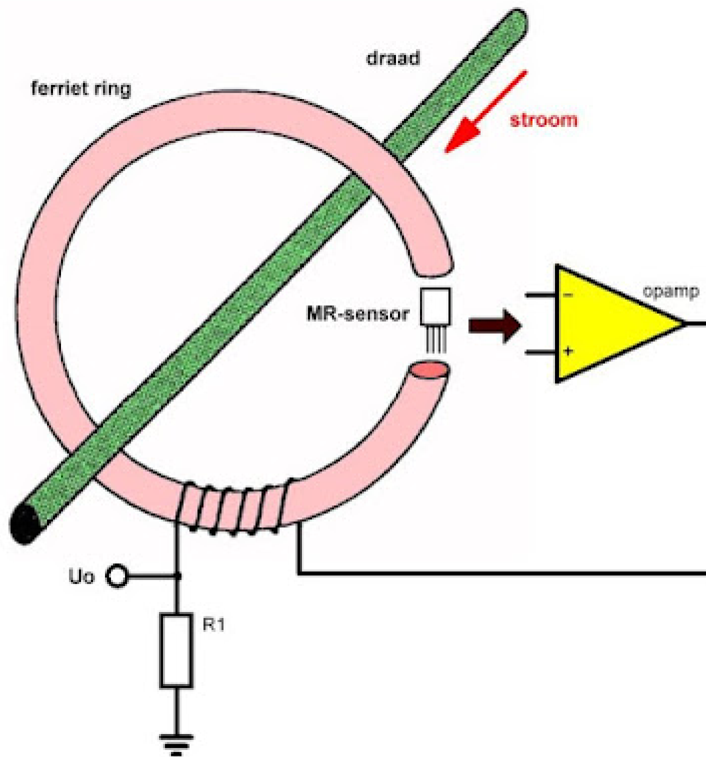
Magnetoresistieve sensoren voor het meten van stroom kennen deze nadelen niet. Deze sensoren hebben per definitie een galvanische scheiding zodat er potentiaalvrij kan worden gemeten en er dus ook geen terugwerking ontstaat. Daarnaast bieden zij een grote nauwkeurigheid en een grote bandbreedte. U kunt dergelijke sensoren gebruiken voor het meten van gelijk- en wisselstromen in bereiken van 0,1 A tot 4.000 A bij een bandbreedte van 0 Hz tot 100 kHz.
Vergeleken met het concurrerende meetprincipe op basis van het Hall-effect bieden magnetoresistieve sensoren het voordeel van een betere lineariteit en een grotere storingsongevoeligheid, dankzij het hogere signaalniveau op het sensorelement. De sensoren werken bovendien over een temperatuurbereik van -40 °C tot +120 °C. Hun aanspreektijd is kleiner dan 10 µs. Wat dat laatste betreft bieden Hall-effect sensoren echter een iets betere waarde.

Stromen meten in de praktijk
In de onderstaande figuur is een opstelling getekend waarmee u de stroom door een geleider kunt meten. Zoals bekend ontstaat rond een stroomvoerende geleider een magnetisch veld. De sensor staat op een kleine afstand a van de geleider en vangt dus een deel van dit veld op. Zoals uit de grafiek blijkt is de uitgangsspanning U_o binnen een bereik van -20 A tot +20 A zo goed als recht evenredig met de grootte van de stroom. Wél blijkt uit deze grafiek dat een MR-sensor een zeer kleine uitgangsspanning levert en u het signaal dus flink moet versterken.



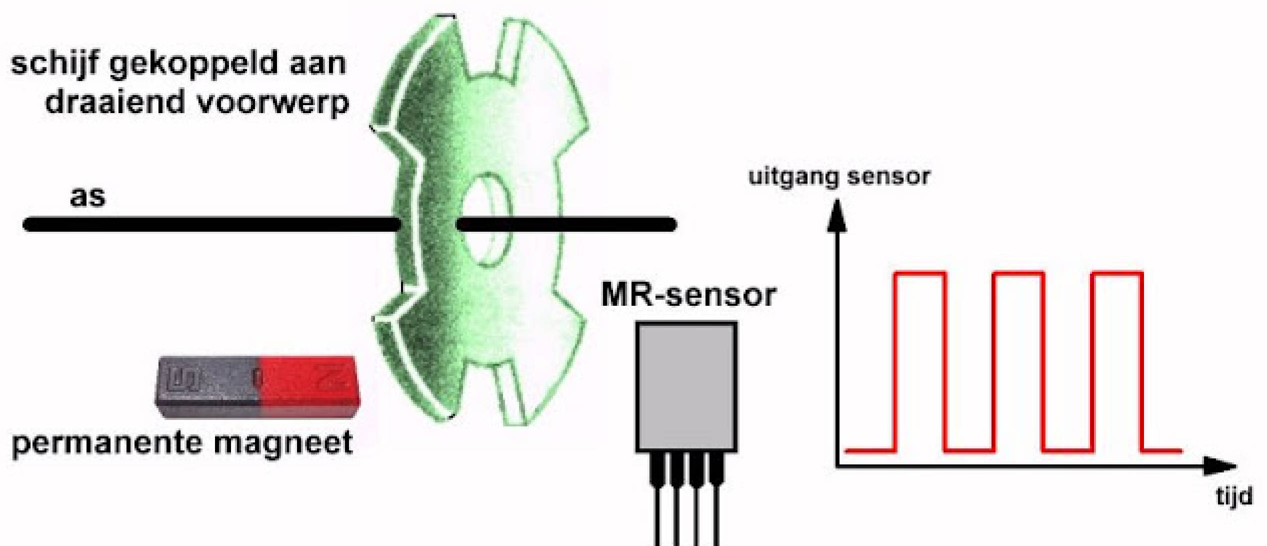
De eenvoudigste manier voor het meten van stromen. (© 2021 Jos Verstraten)

In de onderstaande figuur is een betere opstelling geschetst. De draad waarin u de stroom moet meten wordt omgeven door een kleine ferriet ring met een luchtspleet. In deze luchtspleet wordt de sensor gemonteerd. De versterkte sensorspanning wordt via een klein spoeltje op de ferriet ring aan de belastingsweerstand R1 aangeboden. De stroom die door dit spoeltje vloeit levert het hulpveld voor het instellen van de sensor.



Een betere opstelling voor het meten van stromen.
(© 2021 Jos Verstraten)

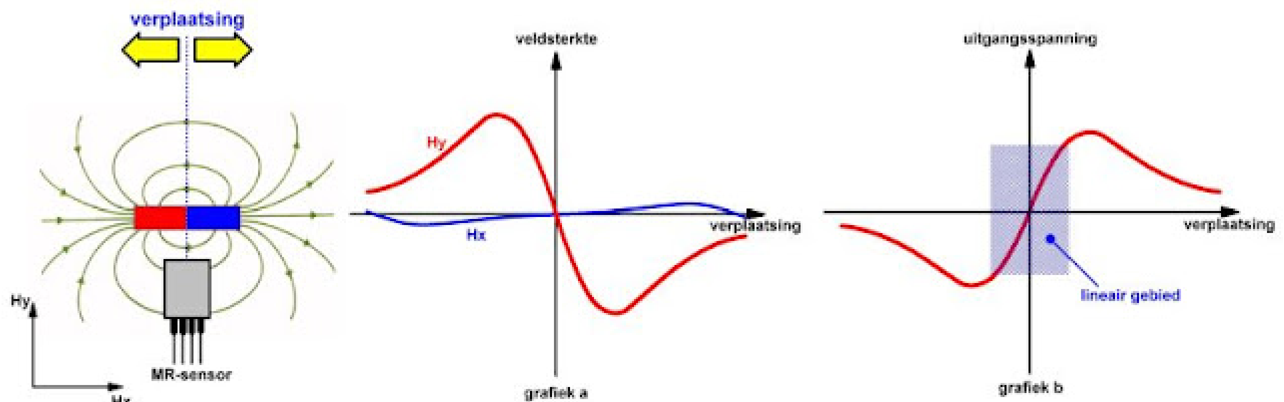
Het meten van toerentallen
Het principe is natuurlijk algemeen bekend. Monteer op de as van het draaiend voorwerp een schijf met inkepingen. Zet aan de ene kant van die schijf een permanent magneetje en aan de andere kant een MR-sensor. De schijf onderbreekt het magnetisch veld van de magneet en dit verschijnsel wordt omgezet in een blokvormige spanning op de uitgang van de sensor. De frequentie van dit signaal, gedeeld door het aantal inkepingen in de schijf, is gelijk aan de frequentie van het draaiend voorwerp.



Het meten van een toerental. (© 2021 Jos Verstraten)

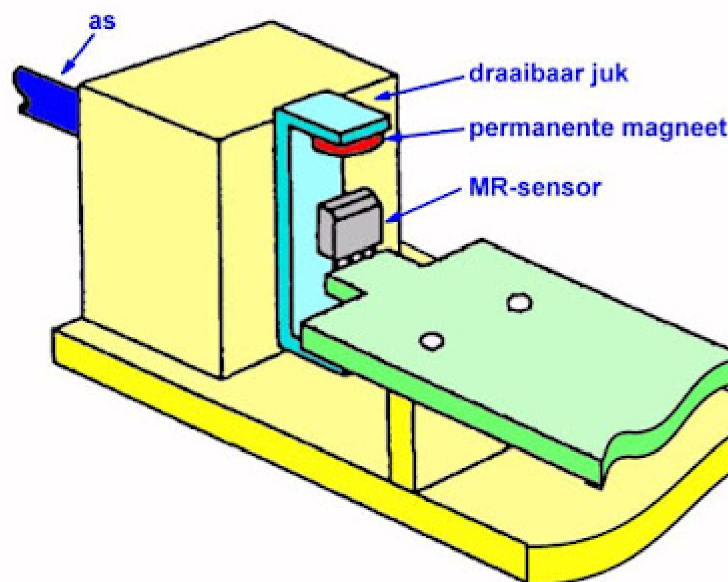
Het meten van lineaire verplaatsingen
Dank zij de specifieke vorm van de karakteristiek van magnetoresistieve sensoren kunt u deze onderdelen op een vrij eenvoudige manier toepassen voor het meten van kleine lineaire verplaatsingen. Het principeschema is getekend in de onderstaande figuur. De sensor wordt opgenomen in het veld van een permanente magneet en wel zo dat magneet en sensor loodrecht op elkaar staan. De sensor wordt nu onderworpen aan een horizontaal en verticaal

magnetisch veld. Het horizontaal veld Hx levert het noodzakelijke hulpveld, het verticale veld Hy kunt u gebruiken om de positie van sensor ten opzichte van de permanente magneet te bepalen.
Als de magneet heen en weer wordt bewogen zal het veld Hy sterk in grootte variëren, terwijl het veld Hx vrijwel constant blijft (grafiek a). Het gevolg is dat ook de uitgangsspanning van de sensor zal variëren en wel volgens grafiek b. Binnen bepaalde grenzen is de variatie van de uitgangsspanning zelfs recht evenredig met de verplaatsing van de magneet. Bovendien kan uit de polariteit van het uitgangssignaal informatie ingewonnen worden over de richting waarin de magneet verschuift ten opzichte van de uitgangspositie. Verplaatst u de magneet naar rechts, dan levert de sensor bijvoorbeeld een positief uitgangssignaal, verplaatst u de magneet naar links, dan levert de sensor in dit voorbeeld een negatief uitgangssignaal.



Het meten van een lineaire verplaatsing. (© 2021 Jos Verstraten)

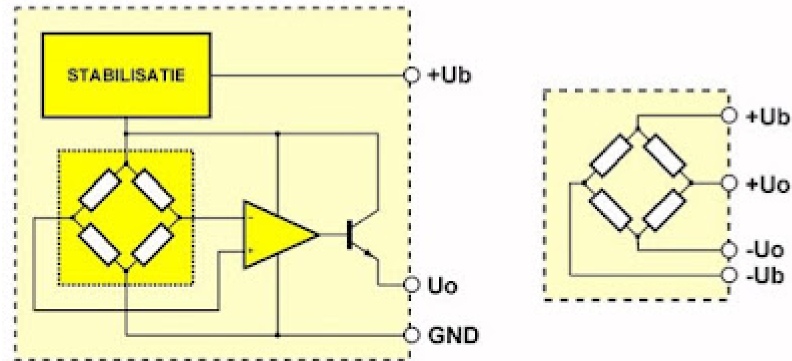
Het meten van hoekverdraaiingen
In de onderstaande figuur is een opstelling getekend waarbij een magnetoresistieve sensor wordt gebruikt voor het meten van de hoekverdraaiing van een as. De sensor is gemonteerd op de rand van een print (*lichtgroen*) die op een vast frame (*lichtgeel*) is gemonteerd. De as (*blauw*) is voorzien van een U-vormig juk (*lichtblauw*) dat rond de sensor draait. Aan weerszijden van het juk zijn kleine permanente magneetjes (*rood*) opgenomen. Als u de getekende opstelling als de nulpositie beschouwt (de twee magneetjes en de sensor op één lijn), dan kunt u met deze opstelling op een tamelijk lineaire manier hoekverdraaiingen van +85° tot -85° meten. Het plusteken staat dan voor verdraaiingen in uurwijzerzin, het minteken voor verdraaiingen in tegenuurwijzerzin.



Het meten van hoekverdraaiingen. (© 2021 Jos Verstraten)

Leverbare magnetoresistieve sensoren

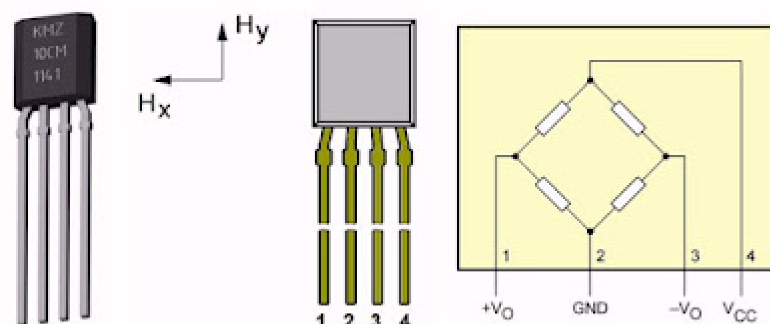
Uitvoeringsvormen
Bij sommige magnetoresistieve sensoren worden de sensor-strip's en de schakeling voor de signaalverwerking (meetbrug en versterker) op één en dezelfde chip geïntegreerd. Er ontstaat dan een schakeling zoals voorgesteld links in de onderstaande figuur. Net zo gebruikelijk echter zijn de typen die alleen de sensor-elementen als meetbrug op de chip bevatten, zie rechts, hetgeen de gebruiker in slaat stelt om de voor zijn of haar applicatie specifieke aanpassingen in de externe verwerkingsschakeling te realiseren.



Uitvoeringen van MR-sensoren. (© 2021 Jos Verstraten)

Over de eenheden die worden gebruikt
Het meetbereik van MR-sensoren wordt door sommige fabrikanten uitgedrukt in kA/m en door andere in tesla. U kunt niet de ene eenheid naar de andere omrekenen, omdat deze eenheden twee verschillende natuurkundige grootheden beschrijven.
De magnetische veldsterkte is een vectoriële grootheid die de sterkte van een magnetische veld uitdrukt. In het SI-stelsel wordt de magnetische veldsterkte uitgedrukt in ampère per meter ofwel A/m. Een oudere eenheid in het cgs-stelsel is de œrsted (1 Œ = 79,5775 A/m).
De tesla (T) is de SI-eenheid van magnetische fluxdichtheid, vernoemd naar Nikola Tesla. Het magneetveld van de aarde varieert tussen 0,000.03 en 0,000.07 T (0,3 tot 0,7 gauss). De vrij sterke permanente magneten in luidsprekers bereiken een veldsterkte van ongeveer 0,2 T. De magneten van MRI-scanners in ziekenhuizen hebben veldsterkten van 1,5 tot 9,4 tesla.

De KMZ10B van Philips
De KMZ10B was jarenlang een van de bekendste MR-sensoren. Wás, want deze in 1998 door Philips ontwikkelde en later door NXP geproduceerde MR-sensor is nu '*obsolete*'. De chip wordt echter door diverse fabrikanten nagemaakt, zoals door Measurement Specialities en TE Connectivity (KMZ10CM). Zoals uit de onderstaande figuur blijkt, is de KMZ10B een '*bare*' sensor die dus niets anders bevat dat de brug van vier van Barber-polen voorziene Hunt-sensoren. De prijs verschilt nogal, de goedkoopste aanbieding die wij vinden is $ 2.92 op eBay.

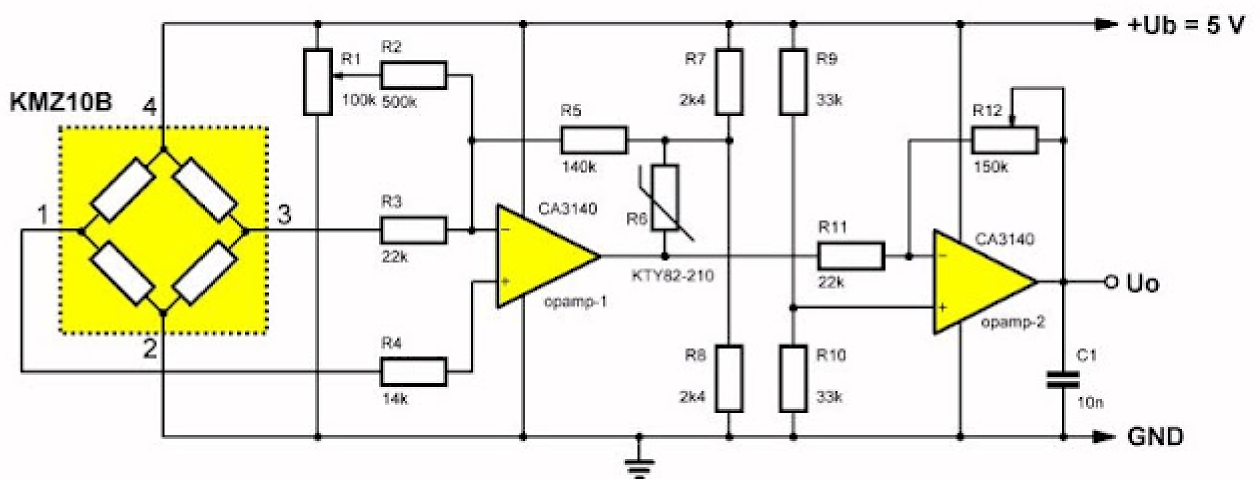


De KMZ10B van Philips/NXP. (© 2021 NXP/Jos Verstraten)

De voornaamste technische gegevens van deze sensor in het kort samengevat:

- **Fabrikant:** Philips/NXP
- **Richtprijs:** $ 3.00 (eBay)
- **Maximale spanning over de brug:** 12 V
- **Maximaal meetbereik Hy:** -2 kA/m ~ +2 kA/m
- **Maximaal hulpveld Hx:** 3 kA/m
- **Gevoeligheid:** [4 mV/V] / [kA/m] typisch
- **Brugweerstand:** 1,6 kΩ ~ 2,6 kΩ
- **Offset spanning:** ±1,5 mV/V typisch
- **Hysteresis:** 100 µV/V typisch
- **Lineariteitsfout:** 6,5 % max.
- **Frequentiebereik:** 1 MHz

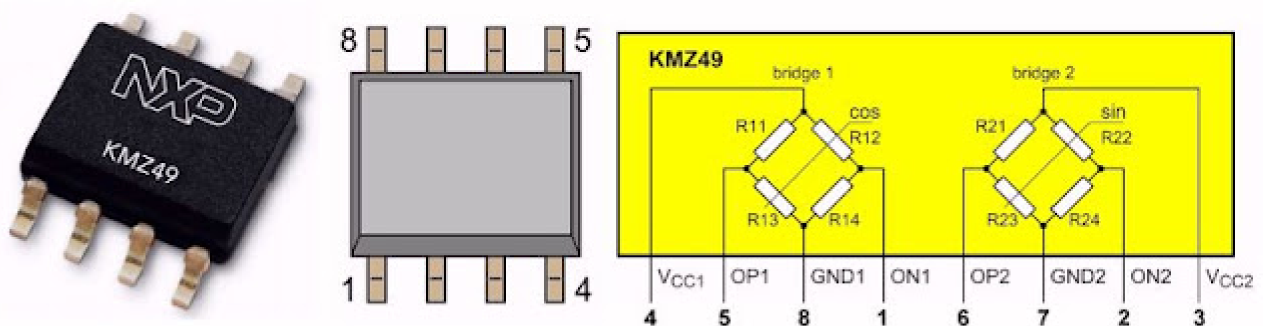
De onderstaande afbeelding geeft het standaard schema dat u kunt gebruiken voor het uitlezen van de KMZ10B. De eerste op-amp compenseert de offset van de sensor en zorgt voor de reductie van de invloed van de temperatuurscoëfficiënt. Deze trap levert bovendien de eerste versterking van het uitgangssignaal van de MR-sensor. De tweede op-amp zorgt voor de eindversterking en voor het afregelen van de schakeling. De uitgang levert een spanning tussen 0,2 V en 4,8 V.



De standaard schakeling rond de KMZ10B. (© 2021 Jos Verstraten)

De KMZ49 van NXP

Dit in 2011 op de markt gebrachte IC bevat twee identieke MR-sensoren, die volledig galvanisch van elkaar zijn gescheiden en die onder een hoek van exact 45° staan. Hiermee is het mogelijk zeer nauwkeurig hoeken te meten in een x/y-assenstelsel. Een magnetisch veld dat naar links of naar rechts in dit assenstelsel kan draaien ten opzichte van de loodlijn van de chip produceert twee uitgangssignalen. Uit de polariteit en de grootte van die signalen kunt u de hoek α berekenen tussen de loodlijn van de chip en de verdraaiing van de magneet. De KMZ49 is door vrijwel alle bekende onderdelenleveranciers uit voorraad leverbaar.



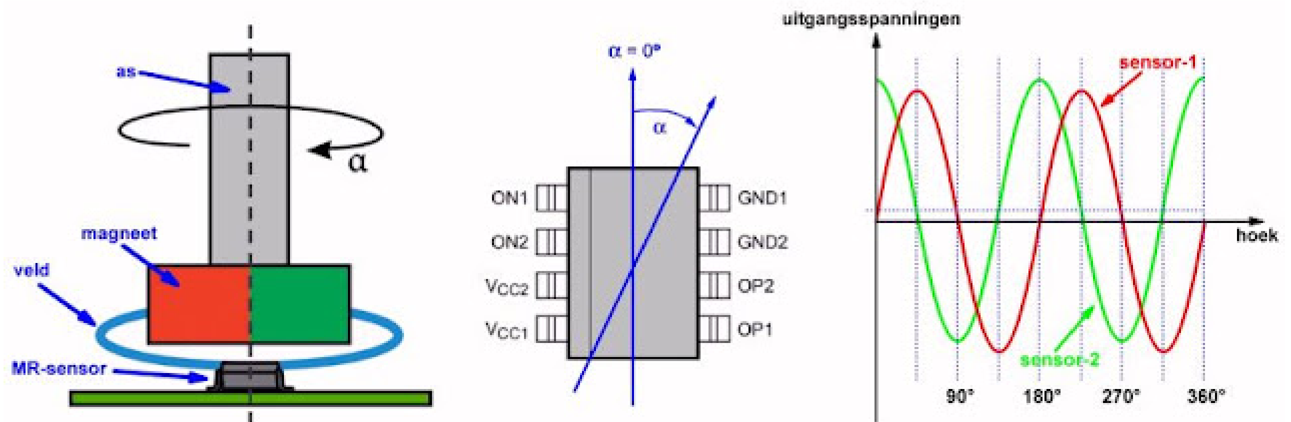
De dubbele sensor KMZ49 van NXP. (© 2021 NXP/Jos Verstraten)

De voornaamste technische gegevens van deze sensor in het kort samengevat:

- **Fabrikant:** NXP
- **Richtprijs:** € 1,88

- **Maximale spanning over de brug:** 9 V
- **Maximaal veld:** 25 kA/m
- **Maximale uitgangsspanning:** 75 mV
- **Brugweerstand:** 2,7 kΩ ~ 3,7 kΩ
- **Offset spanning:** ±2,0 mV/V
- **Frequentiebereik:** 1 MHz

In de onderstaande figuur is schematisch aangegeven hoe u de KMZ49 kunt gebruiken voor het meten van de hoek α tussen de lengterichting van de sensor en de positie van een magneet die vrij draaiend boven de sensor is gemonteerd.



De hoek α meten tussen de sensor en een magneet. (© 2021 NXP/Jos Verstraten)

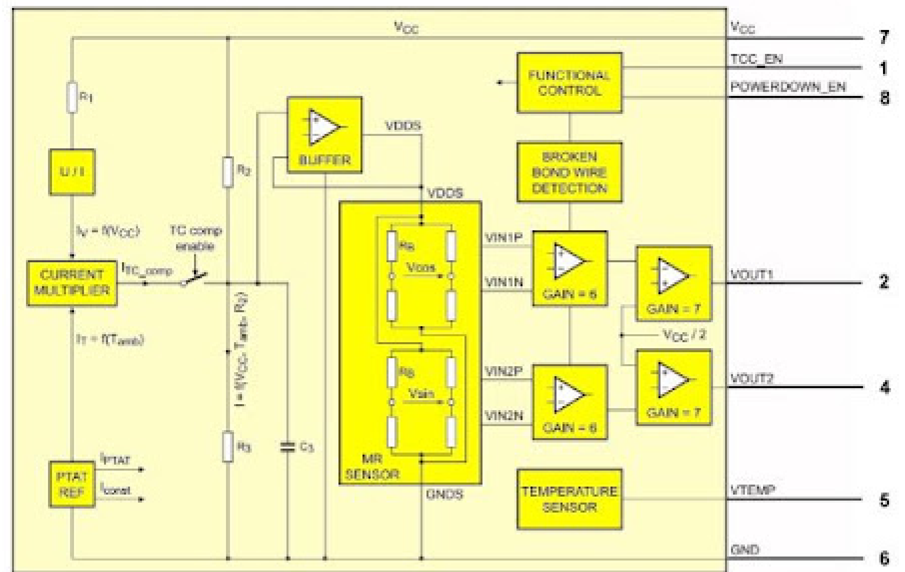
De KMZ60 van NXP

De in 2013 op de markt gebrachte en goed verkrijgbare KMZ60 bevat als basis ook twee onder een hoek van 45° geplaatste MR-sensoren. Daarnaast bevat dit IC alle noodzakelijke schakelingen om deze sensoren aan te sturen en uit te lezen:

- Referentiespanning generator.
- Temperatuurcompensatie.
- Laagdoorlaat filtering.
- Verschilversterkers.
- Eindversterkers.

De chip levert twee single-ended uitgangsspanningen die geschikt zijn voor het aansturen van microcontrollers of ADC's. Pen TCC_EN wordt gebruikt voor het inschakelen van de temperatuur compensatie. De temperatuurscoëfficiënt van de uitgangsspanningen wordt grotendeels gecompenseerd door de versterkers als pen TCC_EN is verbonden met de voedingsspanning V_{cc}. Het versterkte sensorsignaal, dat een negatieve tempco heeft, is beschikbaar op de uitgangspennen VOUT1 en VOUT2 als pen TCC_EN met de massa GND is verbonden. Pen VTEMP levert een temperatuurafhankelijke uitgangsspanning VO(TEMP). De pin POWERDOWN_EN ingang schakelt de chip in power-down modus, stelt de uitgangen op de pennen VOUT1 en pen VOUT2 in op hoge impedantie en deactiveert VTEMP. Deze moet u met de massa verbinden als hij niet wordt gebruikt. Een verbroken-draad detectie voor alle interne verbindingen naar de MR-sensoren trekt de uitgangsspanningen VOUT1 en VOUT2 naar het massa-niveau in geval van een storing.
Beide uitgangen zijn kortsluitvast.





De dubbele sensor KMZ60 met ingebouwde elektronica. (© 2021 NXP/Jos Verstraten)

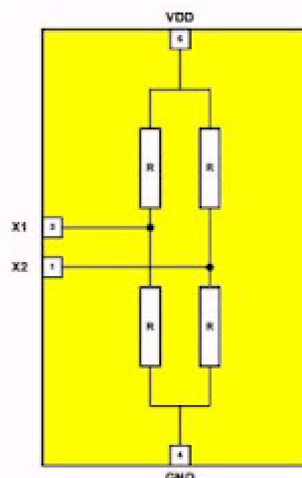
De voornaamste technische gegevens van deze sensor in het kort samengevat:

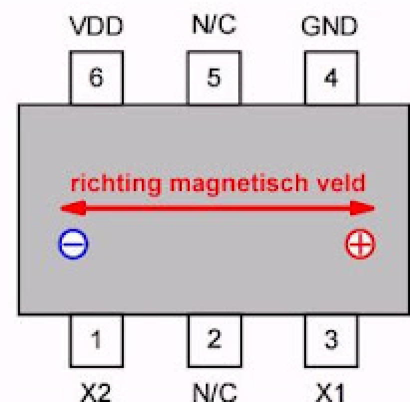
- **Fabrikant:** NXP
- **Richtprijs:** € 2,69
- **Voedingsspanning:** 2,7 V ~ 5,5 V
- **Voedingsstroom bedrijf:** 10,0 mA max.
- **Voedingsstroom power-down:** 16 µA max.
- **Maximaal meetbereik:** 25 kA/m
- **Maximale hoekfout:** ±0,1°
- **Uitgangsweerstand:** 150 Ω max.
- **Uitgangsspanning:** 0,07 • V_{cc} ~ 0,93 • V_{cc}
- **Minimale belastingsweerstand uitgangen:** 5 kΩ
- **Maximale capacitieve belasting uitgangen:** 10 nF
- **Maximale rotatiesnelheid magneet:** 25.000 rpm

De CT100 van Crocus Technology of Murata

Dit gloednieuwe IC (2020) is een '*bare*' MR-sensor, die dus niets meer bevat dan de vier in brug geschakelde sensoren. Het meetbereik gaat van -50 mT tot +50 mT, bij een voedingsspanning van maximaal 5,5 V. De CT100 wordt aangeboden als een onderdeel van Murata, maar op het datasheet staat Crocus Technology als fabrikant. Omdat het IC zo nieuw is kunt u het (nog?) niet overal verkrijgen.







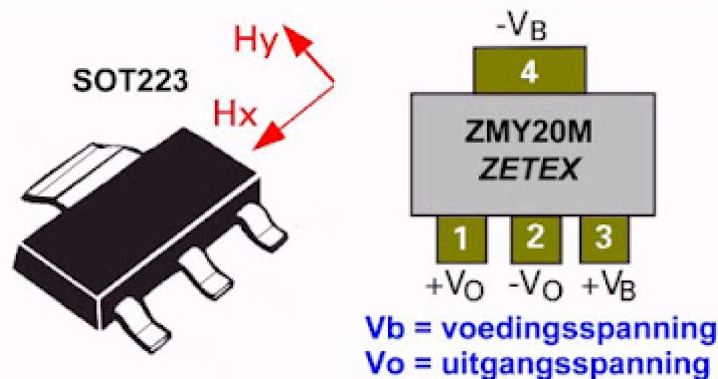
De CT100 van Crocus Technology of Murata. (© 2021 Jos Verstraten)

De voornaamste technische gegevens van deze sensor in het kort samengevat:

- **Fabrikant:** Crocus Technology of Murata

- **Richtprijs:** $ 4.15
- **Spanning over de brug:** 1,0 V ~ 5,5 V
- **Maximale uitgangsspanning:** ±660 mV
- **Meetbaar bereik:** ±50 mT
- **Maximale fluxdichtheid:** ±200 mT
- **Brugweerstand:** 20 kΩ ~ 40 kΩ
- **Offsetspanning:** ±5 mV/V
- **Gevoeligheid:** 3,8 [mV/V] / [mT] ~ 5,2 [mV/V] / [mT]
- **Temperatuurscoëfficiënt**: 3,0 [µV/V] / [°C]
- **Lineariteit:** ±0,5 %

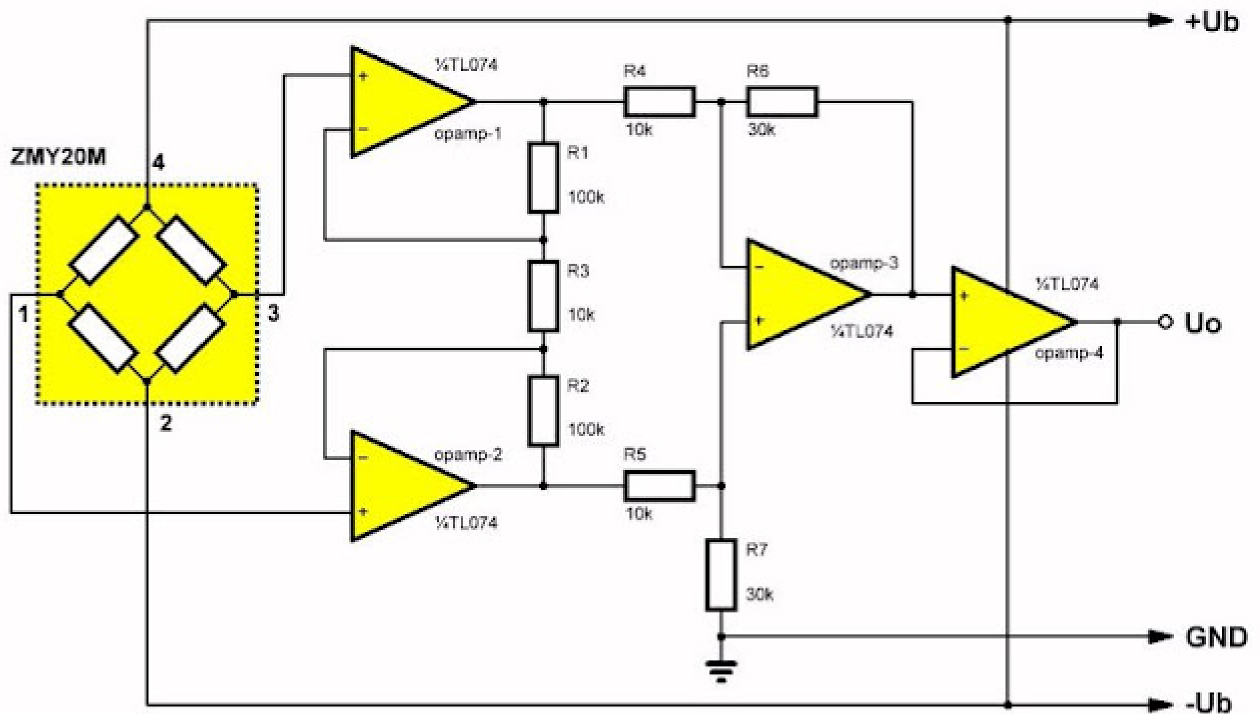
De ZMY20M van Zetex
Dit is een oude, vroeger veelgebruikte sensor (bouwjaar 2004) in SOT223 die nu erg zeldzaam is geworden, maar die u misschien nog wel eens tegenkomt in oude apparatuur. Op eBay is bovendien nog een aantal aanbieders te vinden.
Deze chip heeft als bijzondere eigenschap dat het noodzakelijke hulpveld Hx wordt verzorgd door een in de chip aanwezig klein permanent magneetje. De in SOT223 ondergebrachte '*bare*' MR-sensor wordt gevoed uit een spanning van maximaal 12 V.



De ZMY20M van Zetex met ingebouwde magneet.
(© 2021 Jos Verstraten)

De voornaamste technische gegevens van deze sensor in het kort samengevat:
- **Fabrikant:** Zetex
- **Richtprijs:** $ 4.99
- **Spanning over de brug:** 12 V max.
- **Brugweerstand:** 1,2 kΩ ~ 2,2 kΩ
- **Uitgangsspanning:** 12 mV/V ~ 24 mV/V
- **Hulpveld Hx:** 2 kA/m typisch
- **Gevoeligheid:** 3,0 [mV/V] / [kA/m] ~ 7,0 [mV/V] / [kA/m]
- **Offsetspanning:** ±1,5 mV/V
- **Hysteresis:** 50 µV/V tot Hy = 2 kA/m

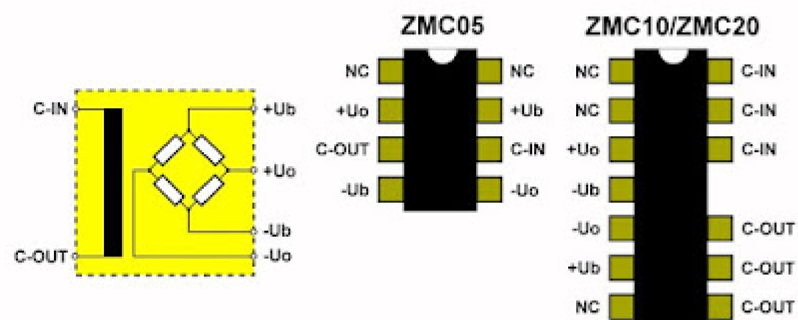
In de onderstaande figuur is het door de fabrikant voorgeschreven schema rond de ZMY20M voorgesteld. Dit schema kunt u uiteraard ook toepassen voor het afsluiten van alle overige '*bare*' sensoren. De vier op-amp's uit een TL074 worden geschakeld als instrumentatie-versterker. Dat is een ideale schakeling voor het versterken van het signaal dat zo'n brug levert, omdat het per definitie een verschilversterker is die het spanningsverschil tussen beide punten van de brug versterkt en omvormt tot een unipolair signaal.



Een instrumentatie-versterker als afsluiting van een MR-sensor. (© 2021 Jos Verstraten)

De ZMC05, ZMC10 en ZMC20 van Zetex
Dit zijn drie MR-sensoren die speciaal zijn ontwikkeld voor het galvanisch gescheiden meten van gelijk- en wisselstromen tot 5 A, 10 A en 20 A. Weliswaar zijn ook deze sensoren uit het begin van deze eeuw '*obsolete*', maar alle drie zijn nog voor prijzen tussen $ 7.50 en $ 10.00 te koop via eBay. In alle drie de chip's zit een metalen strip waardoor de te meten stroom wordt gestuurd. Naast die strip staat de bekende MR-sensor in brugschakeling. Omdat er een klein magneetje aanwezig is, moet u géén extern hulpveld Hx aanleggen.
Er bestaat een lineair verband tussen de toegevoerde stroom en de uitgangsspanning van de chip's.
De ZMC05 zit in een SM-8 behuizing, de twee andere in een gemodificeerd DIL-14 huisje. In de onderstaande figuur zijn de aansluitgegevens van de drie stroomsensoren samengevat.

- C-IN en C-OUT: de aansluitingen voor de stroom.
- $+U_b$ en $-U_b$: de aansluitingen voor de voedingsspanning.
- $+U_o$ en $-U_o$: de aansluitingen voor de uitgangsspanning.



Intern schema en aansluitgegevens van de ZMC-sensoren.
(© 2021 Jos Verstraten)

De gemeenschappelijke specificaties zijn:

- **Fabrikant:** Zetex
- **Spanning over de brug:** 12 V max.
- **Lekstroom primair/secundair:** 100 nA max.
- **Brugweerstand:** 1,2 kΩ ~ 2,2 kΩ
- **Stripweerstand:** 0,7 mΩ typisch
- **Gevoeligheid ZMC05:** 0,7 [mV/V] / [A] typisch

- **Gevoeligheid ZMC10:** 0,5 [mV/V] /[A] typisch
- **Gevoeligheid ZMC20:** 0,25 [mV/V] / [A] typisch
- **Offsetspanning:** ±2,0 mV/V
- **Frequentiebereik:** 100 kHz